引用格式：王超, 孙福全, 许晔, 等. 乌克兰危机下的全球能源格局变化及能源科技发展新特点. 中国科学院院刊, 2023, 38(6): 875-886

Wang C, Sun F Q, Xu Y, et al. Changes in global energy landscape and new developments in energy science and technology amid Ukraine crisis. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(6): 875-886

乌克兰危机下的全球能源格局变化及能源科技发展新特点

王 超[1*] 孙福全[1] 许 晔[1] 姜向强[2]

1 中国科学技术发展战略研究院 北京 100038

2 中国石化石油勘探开发研究院 北京 102206

摘要 能源是经济运行的血脉，乌克兰危机爆发引发区域性能源供应危机和全球性能源市场动荡，全球能源格局和能源科技发展趋势发生深刻变革，对我国能源领域科技战略产生深远影响。文章基于对世界主要经济体能源战略转向研究，结合国际能源贸易、全球低碳转型和国家能源安全等角度，聚焦能源领域科技战略趋势研判。文章认为：（1）能源供应本土化已成为全球能源科技战略发展方向；（2）清洁能源时代，能源技术成本属性逐渐增强；（3）全球加速清洁能源技术研发进程；（4）清洁能源领域国际科技合作面临新挑战。此外，结合我国能源结构现状，从战略部署、研发平台、研发导向、创新体制和国际合作等角度提出政策建议。研究结果对我国构建能源体系新格局和能源科技新战略提供参考和启示。

关键词 乌克兰危机，科技战略，清洁能源，能源安全

自 2022 年 2 月 24 日乌克兰危机爆发以来，美西方国家对俄罗斯实施了前所未有的多轮次、全方位、大规模制裁[1]。乌克兰危机进一步凸显了能源的战略地位，西方国家的对俄制裁和俄罗斯的反制措施已给全球能源格局带来持久、深刻和广泛的影响[2]。俄罗斯作为全球第一大天然气出口国、第二大石油出口国[3]，在全球化石能源供应链的位置举足轻重。乌克兰危机引发的欧洲能源危机刺激欧美主要经济体加速调整本国能源战略，全球能源格局、国际能源贸易、全球能源转型和能源科技发展趋势必将发生深刻变革，对我国经济社会发展和能源科技战略也将产生深远影响。

*通信作者

资助项目：中国博士后科学基金（2021M693105），国家社会科学基金重大研究专项（21VGQ003）

修改稿收到日期：2023年6月8日

1 乌克兰危机引发国际化石能源价格飙升

乌克兰危机爆发前，受疫情后经济复苏、传统能源投资不足和新能源波动性问题日益凸显等因素影响，国际能源价格在2021年度剧烈上涨，欧洲迎来近年首次能源供应危机。叠加“欧佩克+”2022年产能释放不及预期，美国页岩油产量恢复缓慢等因素，国际油价一路攀升，2022年1月26日布伦特原油期货价格盘中突破90美元/桶关口。

乌克兰危机爆发后，国际原油、天然气和煤炭供给趋紧，全线价格大幅上涨（图1）。原油方面，国际油价在对俄罗斯制裁中震荡上行，持续高位徘徊。从第一轮至第三轮西方制裁，国际油价在半月内由90多美元/桶飙升至130多美元/桶（7年来首次突破100美元/桶）[4]。天然气方面，欧洲气价屡创新高。欧洲基准的荷兰产权转让设施（TTF）天然气现货价波动剧烈，乌克兰危机爆发当日，价格较2022年2月初上涨50.18%。随着西方制裁持续和俄罗斯“卢布结算令”发布，2022年3月8日天然气价格冲至69.32美元/MMBtu①，是2021年同期价格

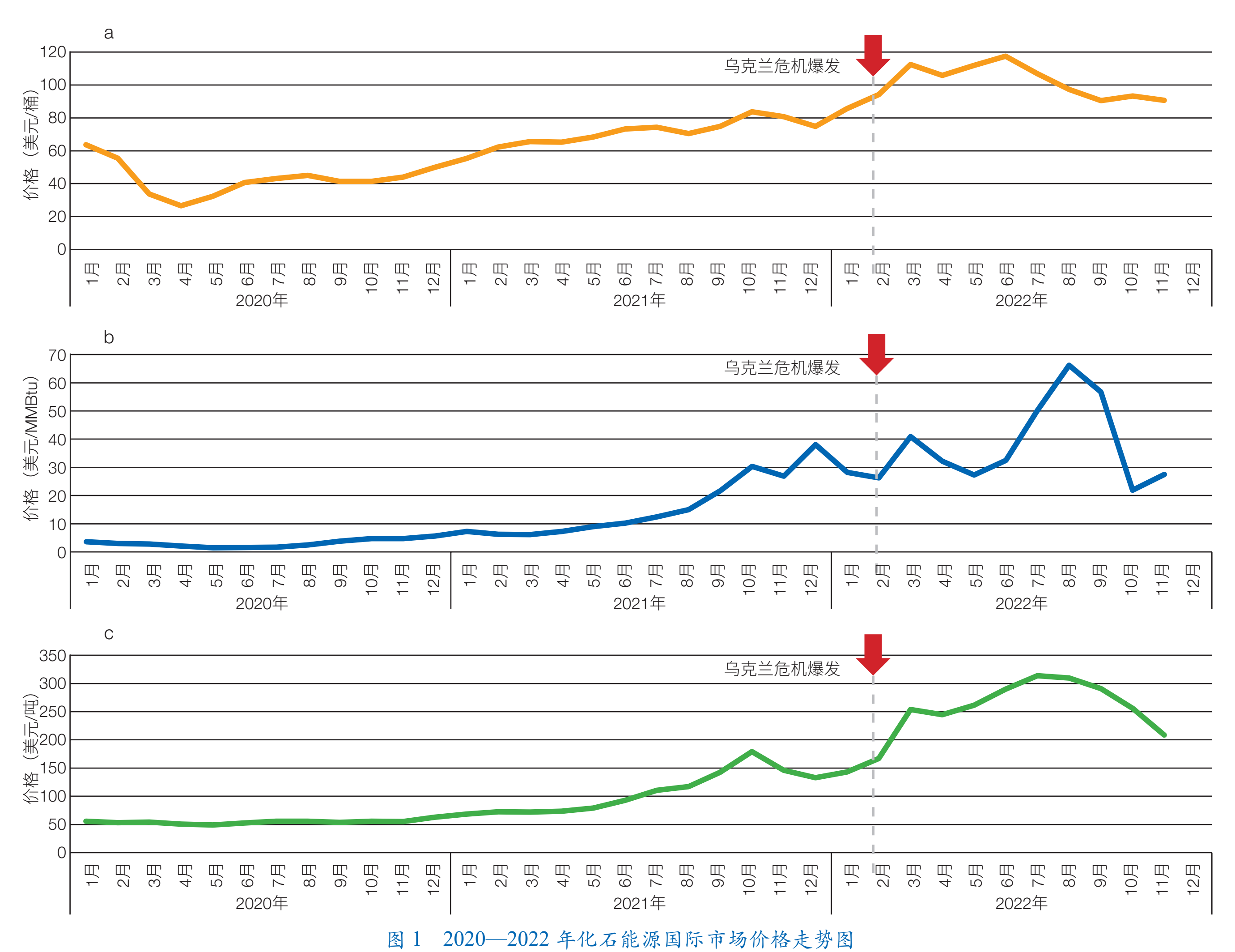


图1　2020—2022年化石能源国际市场价格走势图

Figure 1　Price index of fossil energy in international market from 2020 to 2022

（a）布伦特原油；（b）欧洲基准的荷兰TTF天然气；（c）欧洲ARA三港动力煤

(a) Brent Oil Price; (b) Dutch TTF Natural Gas Price; (c) European ARA Thermal Coal Price

① MMBtu，每百万英制热量单位（million British Thermal Units），1 MMBtu=1.055 GJ，1桶原油=5.8 MMBtu。

的12倍，并于2022年8月达到峰值。煤炭方面，国际动力煤市场供应紧张，煤价一路暴涨。欧洲ARA三港动力煤价格在乌克兰危机后一路走高，由冲突当日的195美元/吨暴涨至2022年8月22日的328美元/吨，涨幅68.2%。

2 欧美主要经济体加速能源战略调整

2.1 欧盟加速"能源独立战略"

欧盟能源体系严重依赖俄罗斯能源进口。尽管欧盟可再生能源比例近年持续提高，但化石能源仍占能源消费总量的60%左右，且对外依存度在70%以上。俄罗斯在三大化石能源领域均是欧盟第一大进口国，2021年欧洲管道天然气、液化天然气、石油、煤炭对俄罗斯依存度分别为45.25%、16.08%、29.66%和48.17%（图2）[3]。此外，欧洲能源危机引发能源价格上涨，不断推高欧洲用能成本。

面对能源供应危机和能源价格上涨的双重考验，欧盟正努力摆脱对俄罗斯能源依赖，提高能源独立性。2022年5月18日，欧盟委员会发布《欧洲廉价、安全、可持续能源联合行动》（*REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy*），明确了能源独立的主要任务[9]。近期目标是通过天然气进口多元化和低碳气体（氢气和生物质气）供应，稳定能源价格和保障天然气供应。中期目标（2027年）是通过加快能源转型和提高能效，摆脱对俄罗斯能源依赖。在天然气进口多元化方面，欧盟计划液化天然气（LNG）和管道气每年分别新增500亿和100亿立方米供应。在能源转型方面，2030年欧盟可再生能源占比目标由40%提升至45%，聚焦太阳能光伏、风能、热泵3个领域供应链建设，同时关注氢能和生物质能领域技术研发。在提高能效方面，欧盟计划将2030年能效目标由9%提

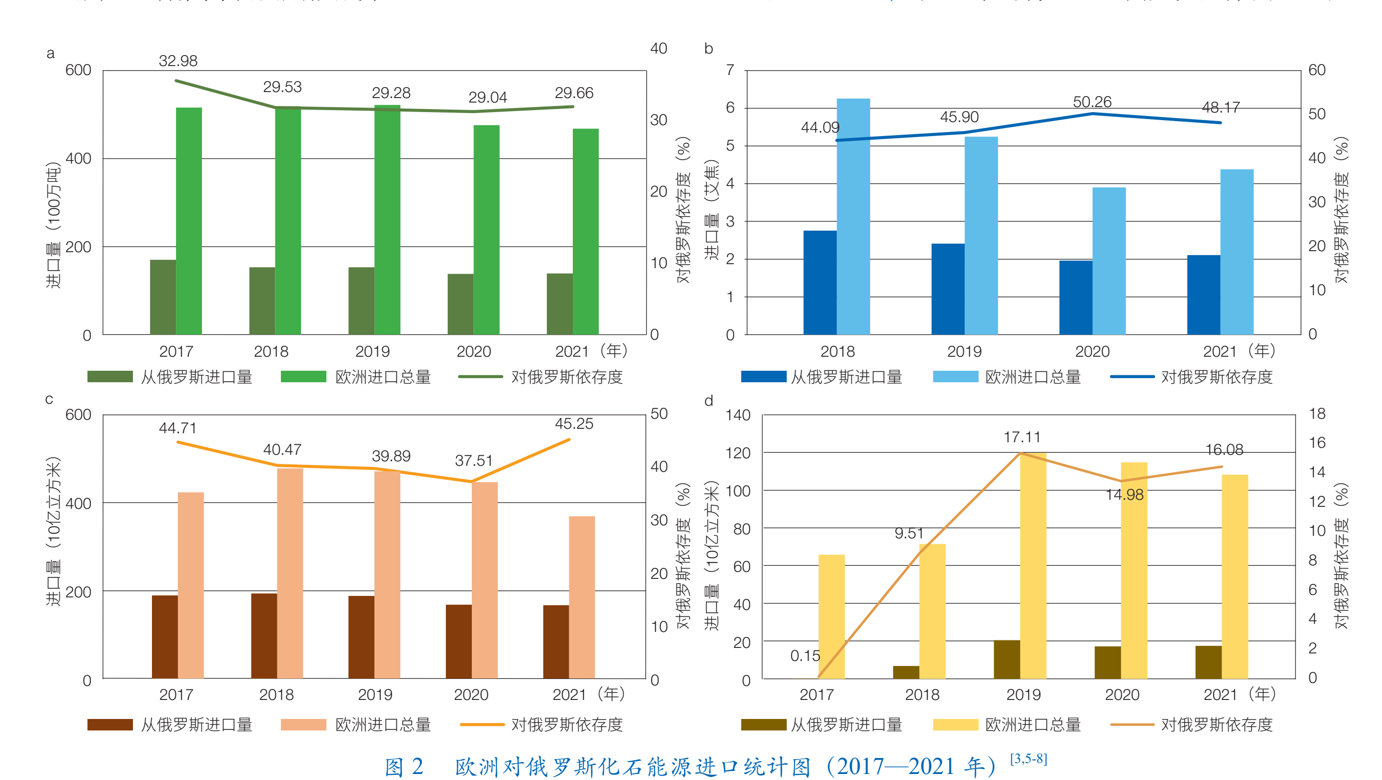


图2　欧洲对俄罗斯化石能源进口统计图（2017—2021年）[3,5-8]

Figure 2　Statistical chart of European fossil energy imports from Russia (2017–2021) [3,5-8]

（a）欧洲对俄罗斯原油进口统计；（b）欧洲对俄罗斯煤炭进口统计；（c）欧洲对俄罗斯管道天然气进口统计；（d）欧洲对俄罗斯液化天然气进口统计

（a）Statistics of European crude oil imports from Russia; （b）Statistics of European coal imports from Russia; (c) Statistics of European pipeline natural gas imports from Russia; (d) Statistics of European LNG imports from Russia

高至13%。

2.2 德国反思“能源转型战略”

21世纪以来，德国能源转型政策为其赢得了全球道德制高点。作为全球能源转型的“优等生”，德国将与俄罗斯能源贸易作为其能源转型战略的基石，积极推进“弃煤”“弃核”，大力发展可再生清洁能源。尽管德国可再生能源发电量位列欧洲第一，但化石能源仍是德国能源消费主体。2021年，化石能源占德国一次能源消费总量的76.4%[10]，且石油、天然气和煤炭对俄罗斯依存度分别约为31%、60%和24%[11]，俄罗斯已成为德国化石能源进口第一大国。

过于激进的能源转型战略使德国陷入两难境地。煤电和核电曾作为德国重要的电力构成单元，支撑德国工业发展。但激进的环保主义政策要挟德国政府大力推进“弃煤”“弃核”进程，确定了2022年前和2030年前分别彻底放弃本土核能发电和燃煤发电的能源转型目标，并将转型过渡阶段化石能源供给寄希望于俄罗斯（典型案例即为“北溪1号”和“北溪2号”管道的修建）。德国对俄罗斯能源的高度依赖，使其在此次乌克兰危机中陷入安全与价值观利益同现实经济能源利益的矛盾之中。欧盟对俄罗斯的多轮制裁迫使德国加速摆脱对俄罗斯能源依赖，对俄罗斯石油依存度呈快速下降趋势，即由2022年2月的29.6%降至2022年9月的19.3%（图3）[12]。

乌克兰危机引发的欧洲能源危机打乱了德国能源转型进程，其能源供给缺口迫使朔尔茨政府反思并调整能源发展战略。① 近期曾权衡是否延长现存核电站寿命，但为时已晚；论证分析认为德国核电站已没有重启可能。② 计划延长燃煤机组运行，并进一步扩大煤炭用量以填补俄气缺失造成的电力供应缺口。③ 全力加速可再生能源部署，拟将100%可再生能源发电目标提前至2035年，其中光伏新增装机容量从2022年7 GW增加至2028年20 GW，较早期计划增幅64.8%。

2.3 法国重启“核能复兴战略”

受制于本土化石资源匮乏现状，法国能源发展呈现“核能主导，绿电跟跑”特征。2020年，法国核能发电量占比达70.6%[13]，是全球核能发电占比最高的国家。此外，法国可再生能源装机容量近年保持快速增长势头。2022年法国可再生能源装机总

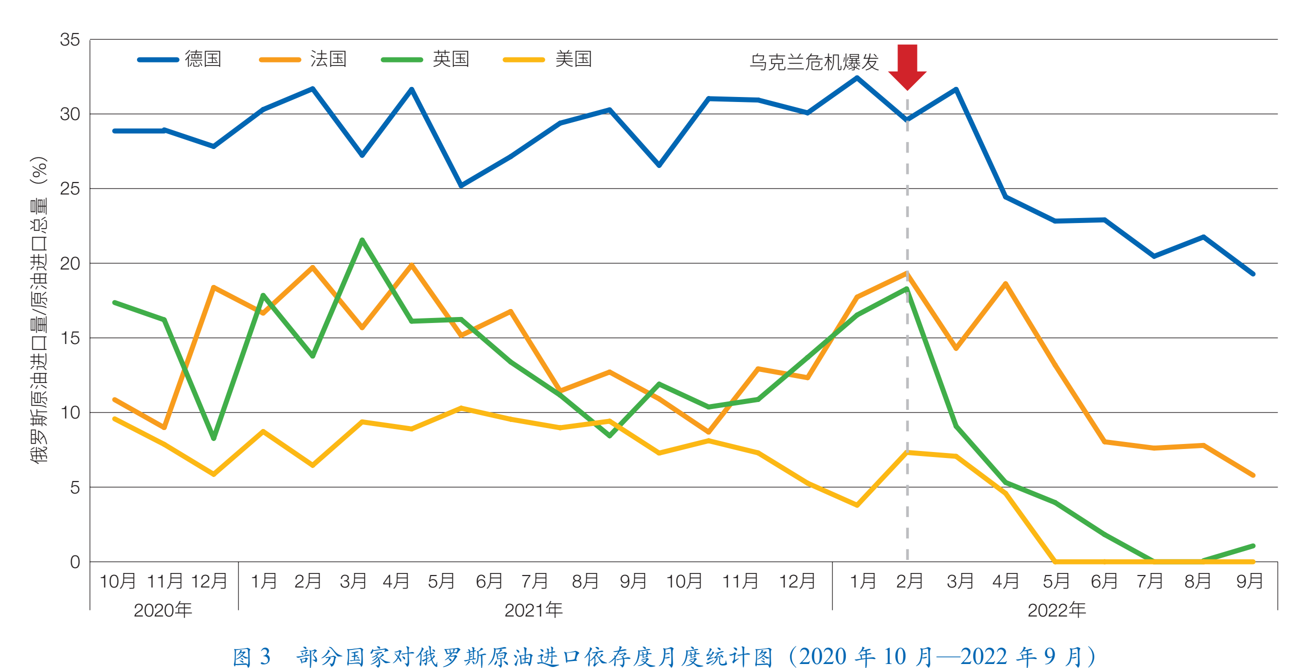


图3 部分国家对俄罗斯原油进口依存度月度统计图（2020年10月—2022年9月）

Figure 3 Monthly statistical chart on crude oil import dependence on Russia of some countries (2020.10–2022.09)

量 65 381 MW，位列欧洲第 3 位，较 2021 年同比增长 8.25%[14]。

法国将能源安全作为能源转型先决条件。法国政府曾在 2019 年《能源和气候法》中提出，根据电力需求变化在 2035 年前关闭 14 座核反应堆，使核能在其电力结构中的占比降至 50%，同时使可再生能源发电量增加近 2 倍。但经专业机构评估认为，现有技术难以保证高占比可再生能源电力系统运行的灵活性和多样性要求，法国政府因此决定暂缓核电站关闭进程。

乌克兰危机加速法国核能战略转向，法国重启核能复兴战略。① 新建核电机组。法国计划从 2028 年起，先新建 6 台 EPR2 型核电机组，后再增建 8 台机组。首台新机组 2035 年投运，预计 2050 年新建核电机组总容量达到 25 GW。② 旧核电机组延寿。法国计划将现有核电机组在符合安全条件前提下继续延寿运行，寿期从 40 年延长至 50 年以上。

2.4 英国推行“能源安全战略”

乌克兰危机后，英国政府发布《英国能源安全战略》。该战略延续了 2020 年发布的《绿色工业革命 10 点计划》的相关政策，但将未来能源发展重心进一步聚焦于海上风电、核能和氢能三大领域。

海上风电领域。鉴于气候因素和陆地资源限制，以及丰富的海上风力资源，英国一直将海上风电作为可再生能源发展重点，旨在成为全球海上风电领导者和浮动式海上风电先驱者。英国政府计划精简行政审批流程，加速海上风电项目推进，力争 2030 年海上风电装机容量达到 50 GW，其中浮动式海上风电装机容量达到 5 GW。

核能领域。① 计划至 2050 年民用核能部署增加至 24 GW（是目前的 3 倍），8 个反应堆投入运营，届时核电将提升至英国电力系统的 25%（现阶段占比 15%）。② 设立核能启动基金（1.2 亿英镑），加快小型模块化核反应堆（SMR）和先进模块化反应堆（AMR）等先进核技术研发。

氢能领域。① 至 2025 年形成大于 1 GW 的绿氢生产能力，并构建起适合氢能产业发展的商业模式。② 至 2030 年将低碳氢产能达到 10 GW，且绿氢占比超过 50%。

2.5 美国实施“能源控制战略”

乌克兰危机使美国对欧盟实现了能源控制的战略目标。美国通过鼓动对俄罗斯能源出口限制，施压“北溪 2 号”管道投运，切断欧盟能源供应源头，从而迫使欧盟转投美国以填补其能源供应缺口，蚕食俄罗斯的欧盟能源市场份额，提高美国全球能源市场话语权。

2022 年 3 月 25 日，美国与欧盟成立能源安全联合工作组，承诺 2022 年至少向欧盟额外出口 150 亿立方米的 LNG，并在 2030 年前额外提供约 500 亿立方米 LNG。短期视角，美国欲协助欧盟保障天然气供应，稳定全球化石能源价格；长期视角，美国旨在胁迫欧盟减少对俄罗斯能源依赖，实现美国对欧能源控制。美国对欧洲 LNG 出口的大幅提升，将极大刺激美国本土油气产业发展。

3 乌克兰危机下的全球能源格局展望及思考

3.1 煤炭将成为欧洲短中期替代能源

在欧洲能源安全受到不断冲击的背景下，欧洲短期能源战略已由“气候安全”向“能源安全”转变。为应对能源供应不足、天然气价格上涨和摆脱对俄罗斯能源依赖，基于能源政策、能源价格、能源安全和资源禀赋角度分析，煤炭将成为欧洲短中期最为快速的替代能源[15]；欧洲燃煤发电量预计将大幅反弹，燃煤发电仍是保障欧洲电力需求的能源基石。① 能源政策方面，欧洲多国重启煤电以应对天然气供应不足。针对欧盟 2022 年底对俄罗斯天然气进口量减少 2/3 的承诺，德国、意大利、英国等相继推迟燃煤电厂退役进程，延长燃煤电厂服役年限。② 能源价格方面，天然气价格上涨凸显了煤炭的比价优势。乌克兰危机

后，受制于欧洲管道气停供、LNG基础设施不足、国际LNG长协锁定，欧洲的全球“抢气”行动大幅推高了全球天然气价格，煤炭的价格优势进一步凸显。③ 能源安全方面，可再生能源短期无法承担保证欧洲能源安全的重任。虽然欧洲可再生能源占比高，但因总量不足、供应不稳定和成本较高的现状问题，尚不能保证欧洲能源安全。④ 资源禀赋方面，欧洲煤炭资源相对丰富。2020年欧洲煤炭探明储量占全球总量的12.8%，远高于其石油和天然气的全球占比，后两者分别为0.8%和1.7%[5]。

3.2 国际油气贸易版图重建

俄罗斯能源出口重心“由西向东”转移。2020年，经济合作与发展组织（OECD）中的欧洲国家占俄罗斯天然气出口总额的71.9%。乌克兰危机爆发后，欧盟转投美国LNG，俄罗斯的欧洲能源市场被美国蚕食。在此背景下，俄罗斯能源出口重心“由西向东”转移。① 冲突爆发后印度超量购买俄罗斯石油。3月份对印原油出口达到30万桶/天，4月份增至70万桶/天，俄原油占印度原油进口总量已由冲突前不足1%激增至如今约17%。② 中俄签订能源供应协定[16]。中俄两国在2月初分别签订了20万桶/天原油10年供应协定和100亿立方米天然气供应协定。

美国通过油气出口进一步扩大全球化石能源市场影响力。页岩油气革命使美国本土油气产量激增，使其摆脱对外油气进口依赖[17]，实现美国能源独立；并且，成为全球油气供应增长中心，跃升为全球主要油气出口国，大幅提升国际能源市场话语权。乌克兰危机爆发后，美国加大本土页岩油气资源开发力度。一方面是鉴于欧洲油气供应短缺、中东油气产能制约等因素影响，美国提升本土油气产能以支撑对欧洲能源出口，实现对欧能源控制，维持和强化美国的全球霸权。另一方面，美国对欧洲LNG出口推行“双标价格”政策，对欧洲出口气价约为美国本土气价的3—4倍，国际能源价格大幅上涨及对欧洲LNG出口给美国能源行业带来巨额经济利益。

欧盟天然气供应多元化，本土能源供应比例提升。为破解欧洲能源危机，欧盟在“能源独立计划”中明确提出了多元化天然气供应。① 大幅提升LNG供应/接收能力。欧盟同美国成立了能源联合小组，旨在提升LNG运输能力，保障短期欧洲能源供应。② 寻求卡塔尔和“欧佩克+”产量支持。德国、法国等正加紧同卡塔尔就LNG采购协议进行谈判，同时呼吁“欧佩克+”释放产能，缓解欧洲能源危机。③ 加速提升本土能源供应比例。英国、荷兰放开天然气开发限制，挪威全力保障天然气供应，德国延长燃煤电厂运行周期，法国重启核能复兴战略。

3.3 欧盟、美国、俄罗斯能源转型进程将显著分化

随着乌克兰危机不断发酵，化石能源价格高涨和对俄罗斯制裁刺激，全球能源转型进程预计将显著分化。欧盟全面加快清洁能源转型步伐，美国油气产业发展或制约转型进程，俄罗斯能源低碳转型乏力。

欧盟短期能源“阵痛”激发其清洁能源产业快速发展。欧洲是全球能源低碳转型的倡导者和支持者。虽然欧盟拟采取多元化进口天然气、扩大本土天然气产能和储备、建设LNG接收站、重启燃煤机组等举措，提振化石能源产业以解决短期能源危机。但长期而言，发展绿色能源实现能源独立已成为欧洲普遍共识。欧盟委员会及欧盟成员国德国、法国等近期相继调整能源战略，大幅提高清洁能源发展目标，大幅缩短清洁能源部署周期，充分反映出清洁能源仍是欧洲长期能源战略重心。

美国本土油气产业振兴或制约能源转型进程。拜登政府曾发布《美国长期战略：2050实现净零排放路径》[18]，承诺2035年构建零碳电网，2050年实现净零排放，推动清洁能源发展，限制化石能源投资。乌克兰危机后，基于美国对欧能源控制的国家战略，拜登政府敦促加大本土油气勘探开发力度。贝克休斯钻井数据揭示，美国2022年5月钻井数量为719台，较

2021年同期增加266台，增幅58.7%②。近期国际油价大涨使美国石油公司利润大增，推升美国本土市场投资，提振美国油气行业，但这致使清洁能源的高成本问题进一步凸显，在一定程度上或影响清洁能源技术的商业推广和研发投入。

*俄罗斯国家财力损失致使其能源低碳转型乏力。*能源出口是俄罗斯的国家经济命脉，石油天然气收入占俄罗斯2021年度收入的约45%。作为全球能源大国和碳排放大国，俄罗斯曾提出2060年前实现碳中和的目标。乌克兰危机后，受到西方经济、军事、科技、文化、能源多领域制裁及石油天然气对外出口限制，俄罗斯经济遭受沉痛打击。俄罗斯中长期经济发展将更加依赖化石能源产业，能源转型将面临国家财政、经济发展和技术创新等多方面因素制约，2060年碳中和目标的实现概率大幅降低。

3.4 全球能源结构将由“化石能源”主导加速转向“化石+清洁能源”

*化石能源仍是当今全球的主体能源类型。*美国能源信息署（EIA）研究指出，2020年全球煤炭、石油、天然气、可再生能源和核能的能源消费占比依次为25.87%、30.32%、24.49%、14.75%和4.57%；在全球能源系统低碳转型背景下，2050年上述能源比重预计依次调整为19.93%、28.04%、21.8%、26.53%和3.69%[19]。乌克兰危机暴露出欧洲能源体系的脆弱性和化石能源垄断的安全性，倒逼欧盟进一步推动清洁能源发展，激发全球能源结构加速向“化石+清洁能源”并重转型。

*清洁能源的快速发展为全球能源结构转型奠定基础。*2010—2020年，全球可再生能源发电量由761.2 TW·h增至3147 TW·h，增幅313.4%。其中，太阳能和风能装机容量分别增幅1 664.3%和305.3%[20]。与此同时，新型储能和氢能近年受到高度关注并有望短期实现跨越式发展和规模化应用，从而带动清洁能源占比份额进一步提升。全球能源结构加速向“化石+清洁能源”并重格局转变。

3.5 能源供应本土化将成为国际主流趋势

*当前欧洲能源危机对世界各国起到了非常现实的警示作用，能源安全的国家战略地位显著提升。*受制于对俄罗斯能源依赖，欧盟成员国对俄罗斯的制裁态度严重分化，德国在对俄罗斯多轮制裁中均陷入进退两难的境地。为此，欧盟迫切希望提高能源独立性，大力发展本土清洁能源，实现能源供给自足。

*此外，全球能源系统低碳化转型的大势将助力世界各国实现能源供应本土化，构建独立自主的能源供应体系。*相较于化石能源，清洁能源没有过高的资源禀赋要求，且科技创新是其产业发展的第一要素，这与欧洲的气候、能源和科技战略高度匹配。欧洲能源危机和能源独立意识觉醒，将激发其他国家深思极端情况下的能源本土供应能力，预计能源供应本土化将成为世界大国的标配和国际能源主流趋势。

4 乌克兰危机下的全球能源科技发展新特点

4.1 能源独立意识觉醒改变全球能源科技战略方向

*能源独立是一个国家强盛的基本保障和安全基石。*乌克兰危机引发的欧洲能源危机，迫使世界各国对能源安全展开深刻反思，大幅提高能源本地供给能力已成为国家能源战略的重要组成部分和长期发展目标。

*能源独立意识觉醒和能源供应本土化趋势将加速全球能源科技战略方向调整。*全球能源系统将从传统的跨区域、远距离、大规模输送模式，调整到更多的本地化、多源化、低碳化供给模式，清洁能源、分布式能源、长效储能系统、综合能源服务和智能用能模式将受到广泛关注。

② Baker Hughes. North America Rig Count. (2023-06-02)[2023-06-08]. https://rigcount.bakerhughes.com/na-rig-count.

4.2 清洁能源时代，能源的资源禀赋属性减弱，技术成本属性增强

*化石能源时代，能源属性为“地质型”资源，资源禀赋属性强于技术成本属性。*受制于古生物在地质历史时期空间分布的差异性，当今全球化石能源分布具有典型的地质历史继承性和空间分布差异性特征。例如：世界范围内，中东地区油气资源极为丰富，而我国油气资源相对贫乏。我国范围内，西部内陆地区较东部沿海地区油气资源丰富。当今世界各国油气资源的多寡受地质因素而固化，进一步凸显了石油的战略属性，并成为世界各国争夺的焦点。

*清洁能源时代，能源属性为“地理型”或“技术型”资源，技术成本属性强于资源禀赋属性，具有更大的人为改造性。*太阳能和风能作为“地理型”资源，具有全球普惠性特征，各国均可通过技术创新加大本国资源利用效率。氢能、生物质能和核能作为“技术型”资源，人才、科技要素已超越资源要素成为首要发展因素，通过科技创新提升能源效率、降低用能成本可大幅推进技术普及程度。全球能源系统在低碳化、电气化、智能化转型过程中，关键矿产资源（如锂、铜、镍等）的需求量将有所增加，但地质型资源总体而言将由目前的“燃料”供给向“材料”供给转型，能源的资源禀赋属性减弱，技术成本属性增强。

4.3 清洁能源时代，科技主权是实现能源主权的基石

*在能源系统低碳转型、能源供需多极演化和能源独立意识觉醒的背景下，科技创新对能源产业的发展驱动效应日趋增强，并成为实现国家能源独立的基石。*法国核能战略调整即是典型案例。继2015年美国通用电气完成对法国阿尔斯通电力/电网业务收购后，法国核工业体系遭受严重打击。此次欧洲能源危机倒逼法国政府重启核能发展战略，除构建独立自主的能源体系外，其战略核心是重振法国核能产业链，即构建包括核反应堆设计、核蒸汽系统及核燃料循环供应、常规岛设备供应和核电运营在内的全自主核能产业链和创新体系，重振法国核工业体系。

4.4 乌克兰危机加速清洁能源技术研发，核能再次受到各国关注

*乌克兰危机推动全球能源格局重构，倒逼对进口化石能源依存度较高的欧洲国家加大清洁能源研发力度，加快化石能源替代步伐。*国际能源署清洁能源关键技术数据库揭示[21]，部分欧洲国家在能源转型领域处于国际技术领先地位。在能源转型领域关键核心技术全球排名前5名分别是美国、日本、德国、法国和英国，优势技术领域聚焦于电力、生物燃料和氢能。其中，英国、德国分别在煤气加热重整和合成烃燃料领域处于全球垄断地位；德国、法国、意大利在太阳能、风能、氢和生物质能等领域处于国际领先地位（表1）[21]。基于能源转型领域的技术领先优势，欧盟“能源独立计划”将可再生能源部署目标大幅提升，以求加快构建独立自主的能源供给体系，力争2030年前摆脱对俄罗斯化石能源依赖。可以预见光伏、风电、氢能和生物质能将在欧洲迎来短期井喷式发展。此外，英国、法国等核能发展战略出现重大转向，纷纷加大先进核能技术研发力度，加快新型核电站建设进程，延长现有核电站服役周期。欧洲对核态度出现自福岛核事故以来的最大政策转变。

4.5 清洁能源领域国际科技合作面临较大风险挑战

乌克兰危机爆发前，全球主要经济体将气候变化作为大国博弈和地缘竞争的政治工具，从国内-国际产业政策一体化角度部署本国碳中和战略，借助国际合作提升本国清洁能源科技实力，通过绿色技术、产品出口抢占国际市场份额，以期实现本国经济复苏和产业升级。例如，日本政府2020年发布的《2050年碳中和绿色增长战略》中提出了2类国际合作模式：① 同美国、欧盟开展国际合作，加强关键领域技术研发和相关国际标准、规则制定；② 同新兴经济体开展国际合作，聚焦于海外示范项目建设，抢占绿色技术国际

表1 能源转型领域关键核心技术统计表[21]

Table 1 Statistical table on key technologies in energy transition[21]

序号	技术领域			关键清洁能源技术	技术成熟度*	净零排放重要性	主要技术国家
	一级	二级	三级				
1			太阳能	钙钛矿电池、有机薄膜电池、集成式电池板等	8—9	高	德国、中国、澳大利亚、美国、意大利
2			风能	浮动式风机、浮动式混合能源平台等	8	高	德国、法国、日本、韩国、荷兰
3			煤炭	超临界CO_2循环、燃烧后CCUS等	5—7	一般	加拿大、中国、澳大利亚、美国
4		生产	氢	氢燃气轮机、高温燃料电池、混合燃料电池等	7—9	一般	日本、德国、美国、荷兰、韩国
5			海洋	海洋热能、潮汐能等	4	高	加拿大、日本、中国、丹麦、挪威
6	电力		氨	氨燃气轮机、火力发电混合燃烧等	3—5	一般	日本、澳大利亚
7			地热	增强型地热系统	4	一般	奥地利、克罗地亚、比利时、法国
8			核能	核聚变、小型模块化反应堆、钠冷堆等	1—8	一般	美国、中国、法国、日本、俄罗斯
9		储能	电池储能	锂离子电池、氧化还原液流剂	8—9	高	/
10			机械储能	压缩空气储能、抽水蓄能、液体空气储能	8—11	高	英国、日本
11			传输	特高压、柔性交流电传输系统、高压电网	8	高	/
12		基础设施	集成	智能变频器等	8	高	/
13			分配	超导高压等	6	一般	/
14	合成烃燃料	生产	液体燃料	集中式太阳能燃料、基于氢的液体燃料/甲烷	5	高	德国、瑞士、挪威、澳大利亚、芬兰
15			电解	聚合物电解质膜、海水电解、固态氧化物电解槽	7—9	高	英国、德国、法国、美国、日本
16		生产	甲烷重整	蒸汽重整等	8	高	英国
17	氢		热化学水分解	核能/太阳能	3	一般	日本、加拿大、美国
18			生物质气化	CCUS	5	一般	美国、英国、瑞典、奥地利、荷兰
19		运输		液态氢运输、天然气混氢技术	5—7	一般	挪威、丹麦、日本、英国、加拿大
20		存储		油气田/水层储存	2	高	美国、英国
21			生物柴油/煤油	气化费托合成、合成异构烷烃等	4—6	很高	美国、英国、日本、法国
22	生物燃料	生产	生物甲烷	氢催化甲烷化、生物质气化等	4—7	一般	德国、瑞典、加拿大、美国
23			生物乙醇	酶发酵技术等	7—8	一般	美国、巴西、加拿大、荷兰

* 技术成熟度：1-最初想法；2-制定方案；3-概念验证；4-早期原型；5-大型原型；6-大规模完整原型机；7-商业应用前示范；8-首个商业应用；9-相关环境中商业运营；10-大规模整合；11-通过稳定性验证

* Technology Readiness Levels: 1-Initial idea, 2-Application formulated, 3-Concept needs validation, 4-Early prototype, 5-Large prototype, 6-Full prototype at scale, 7-Pre-commercial demonstration, 8-First of a kind commercial, 9-Commercial operation in relevant environment, 10-Integration needed at scale, 11-Proof of stability reached

市场[22]。

乌克兰危机引发能源危机和粮食短缺，迫使全球供应链重构并转向短链化、本地化，全球经济治理也走向两极化、分裂化，经济全球化进程面临停滞风险，能源领域科技合作面临更大挑战[23]。在此背景下，美国《通胀削减法案》的发布又进一步割裂了全球清洁能源产业链[24]，阻碍资金、技术、产品的全球化最优配置；加剧全球技术、人才和产业竞争，推高全球低碳转型成本。

5 政策建议

乌克兰危机引发全球能源格局变革，能源系统本土化、低碳化进程显著加速，对我国短期能源进口成本和长期国家能源安全均产生重大影响。我国应立足资源禀赋现状，依靠科技创新，构建更具韧性的国家能源系统。

5.1 推动“绿电走廊”“西能西用”等国家能源战略部署

打造能源供销本地化的国家能源战略新格局。东部沿海作为用能高地和资源洼地，要逐步摆脱对“西电东送”“西气东输”的能源依赖，依托沿海风能和太阳能资源，加强构建海上风电、风电制氢和分布式光伏等清洁能源系统，打造能源独立供给的东部“绿电走廊”。西部地区要发挥能源资源丰富的优势，实施“西能西用”“高能西置”战略，将西部能源用于西部经济建设，推动高能耗产业部署于中西部资源丰富地区。

5.2 锁定国家能源科技战略的“能源科技三角”

短中期，我国应遵循“化石能源提存量，清洁能源扩增量”原则，构建围绕“煤炭清洁高效利用、非常规油气勘探开发和清洁能源能效提升”三大核心支点的国家能源科技战略，采用“多能并跑，多轨并行”的科技创新政策，形成“化石能源+清洁能源”合力，实现“能源独立”和“能源低碳”双赢目标。

5.3 搭建能源系统集成化研发平台，加快多能互补、先行先试

为消除可再生能源间歇性的弊端，应加速国内“化石能源与非化石能源”“可再生能源与储能系统”融合发展。① 搭建国家能源系统集成化研发平台，聚焦能源互融互通、跨部门能源流动和能源系统智能化等重点领域。② 积极推进源储平台“建起来”、低碳技术“试起来”、多能场景“用起来”，鼓励多能互补先行先试，促进低碳技术迭代发展，尽早积累实践经验，尽快建立安全高效的多能互补动态融合机制。

5.4 树立低成本化为核心的清洁能源技术研发导向

低碳技术的高绿色溢价成为阻碍其商业推广的关键因素，我国应全面推进清洁能源技术低成本化。① 在国家科技项目中提高低碳技术的成本指标权重；② 发挥能源领军企业作用，加强技术研发和市场推广，借助规模效应实现成本下降。

5.5 构建清洁能源全产业链自主科技研发体制

围绕清洁能源产业链系统部署创新链，形成涵盖全产业的自主科技创新机制。① 构建清洁能源产业链潜在风险预警机制，摸清关键领域原料供给、装备制造、先进材料、关键技术等方面的风险短板，明确自主科技攻关重点。② 构建产业链与创新链深度融合的创新资源配置体系，细化创新主体在产业链、创新链的定位与分工，加速自主科技成果向现实生产力转化。

5.6 围绕清洁能源关键技术开展国际科技合作

能源领域国际科技合作应兼顾战略性与实践性。① 明确不同领域的优势技术国家和关键前沿技术，构建技术领域差异化的国际科技合作战略方针。② 抓住欧盟大力推进清洁能源技术研发的重要契机和俄罗斯积极寻求外界合作的迫切需求，加快能源领域国际科技合作，快速提升我国能源领域核心技术实力。

参考文献

1 易小准, 李晓, 盛斌, 等. 俄乌冲突对国际经贸格局的影响. 国际经济评论, 2022, (3): 9-37.
Yi X Z, Li X, Sheng B, et al. Impact of Russia-Ukraine conflict on international economic and trade landscape. International Economic Review, 2022, (3): 9-37. (in Chinese)

2 冯玉军, 张锐. 乌克兰危机下国际能源供应链断裂重组及其战略影响. 亚太安全与海洋研究, 2023, (3): 17-35.
Feng Y J, Zhang R. The disruption and reconfiguration of the international energy supply chain in the wake of the Ukraine crisis and its strategic influences. Asia-Pacific Security and Maritime Affairs, 2023, (3): 17-35. (in Chinese)

3 bp. bp Statistical Review of World Energy 2022. (2022-07-01)[2023-01-09]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf.

4 Crude Oil Price. Brent Oil Price. (2022-12-20)[2023-01-09]. https://www.oilcrudeprice.com/brent-oil-price-history/.

5 bp. bp Statistical Review of World Energy 2021. London: bp, 2021. (2021-07-08) [2023-01-09]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf.

6 bp. bp Statistical Review of World Energy 2020. (2020-06-07)[2023-01-09]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf.

7 bp. bp Statistical Review of World Energy 2019. (2019-06-11)[2023-01-09]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2019.pdf.

8 bp. bp Statistical Review of World Energy 2018. (2018-06-13)[2023-01-09]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf.

9 European Union. REPowerEU Actions. Luxembourg: European Union, 2022.

10 IEA. Energy Statistics Data Browser. (2022-08-18)[2023-01-09]. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=GERMANY&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource.

11 IEA. National Reliance on Russian Fossil Fuel Imports. (2022-12-09)[2023-01-09]. https://www.iea.org/reports/national-reliance-on-russian-fossil-fuel-imports.

12 IEA. Monthly Reliance on Russian Oil for OECD Countries. (2023-03-15)[2023-03-24]. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/monthly-reliance-on-russian-oil-for-oecd-countries.

13 IAEA. IAEA Annual Report for 2020. Austria: IAEA, 2020.

14 IRENA. Renewable Capacity Statistics 2023. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

15 左前明. 俄乌冲突下煤炭与天然气替代关系研究. 北京: 信达证券, 2022.
Zuo Q M. Research on the Substitution Relationship between Coal and Natural Gas under Russia-Ukraine Conflict. Beijing: Cinda Securities, 2022. (in Chinese)

16 The Oxford Institute for Energy Studies. Russia and China Expand Their Gas Deal: Key Implications. Oxford: The Oxford Institute for Energy Studies, 2022.

17 张君峰, 周志, 宋腾, 等. 中美页岩气勘探开发历程、地质特征和开发利用条件对比及启示. 石油学报, 2022, 43(12): 1687-1701.
Zhang J F, Zhou Z, Song T, et al. Comparison of exploration and development history, geological characteristics and exploitation conditions of shale gas in China and the United States and its enlightenment. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1687-1701. (in Chinese)

18 United States Department of State. The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050. Washington DC: United States Department of State, 2021.

19 U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2021. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2021.

20 IRENA. World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5℃ Pathway. Abu Dhabi: IRENA, 2022.

21 IEA. Energy Technology Perspectives Clean Energy Technology Guide. Paris: IEA, 2022.
22 Japan Ministry of Economy, Trade and Industry. Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050. Tokyo: Japan Ministry of Economy, Trade and Industry, 2021.
23 王安建, 王春辉. 国际动荡局势对我国能源资源安全的挑战与应对策略. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 72-80.
Wang A J, Wang C H. Challenges of international turmoil situation to China's energy resource security and coping strategies. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 72-80. (in Chinese)
24 BCG. US Inflation Reduction Act: Climate & Energy Features and Potential Implications. Boston: BCG, 2022.

Changes in Global Energy Landscape and New Developments in Energy Science and Technology amid Ukraine Crisis

WANG Chao[1*] SUN Fuquan[1] XU Ye[1] JIANG Xiangqiang[2]
（1 Chinese Academy of Science and Technology for Development, Beijing 100038, China;
2 Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China）

Abstract Energy is the blood vessel of an economy. The outbreak of the Ukraine crisis has triggered a regional energy supply crisis and a global energy market turmoil. As a result, the global energy landscape and energy science and technology development trends have undergone profound changes, with far-reaching impact on China's science and technology strategies in the energy sector. Based on the study of energy strategy shift of the world's major economies, this study focuses on research and analysis on the strategic trends of energy science and technology from the perspectives of international energy trade, global low-carbon transition and national energy security. This study believes that: (1) localization of energy supply has become a development direction of global energy science and technology strategies; (2) the cost attribute of energy technology is increasingly prominent in the era of clean energy; (3) the world is accelerating its pace in research and development of clean energy technology; and (4) international science and technology cooperation in the field of clean energy is facing new challenges. In addition, this study also proposes policy recommendations from the perspectives of strategic deployment, R&D platform, R&D orientation, innovation system and international cooperation, taking into account the current situation of China's energy structure. The findings of this study will offer references and insights for China's new energy system structure and new energy science and technology strategies.

Keywords Ukraine crisis, science and technology strategy, clean energy, energy security

王 超 中国科学技术发展战略研究院博士后、副研究员。主要研究领域：能源战略政策研究、能源领域前沿技术跟踪、创新战略政策研究。E-mail: wangc@casted.org.cn

WANG Chao Postdoctoral Fellow and Associate Researcher of Chinese Academy of Science and Technology for Development. His main research focuses on energy strategy and policy, frontier technology tracking in the field of energy, and innovation strategy and policy.
E-mail: wangc@casted.org.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author